

Terfenol-D를 이용한 선형 자기변형 구동기의 설계 및 특성 연구

A Study on Design and Characteristics of Linear Magnetostrictive Actuator Using Terfenol-D

임 채 옥[†] · 정 태 영* · 문 석 준* · 김 병 현*

Chae-Wook Lim, Tae-Young Chung, Seok-Jun Moon and Byung-Hyun Kim

(2003년 2월 8일 접수 : 2003년 3월 7일 심사완료)

Key Words : Terfenol-D, Linear Magnetostrictive Actuator(선형 자기변형 구동기), Induced-strain Actuation Displacement(유도 자유 변위), Blocked Force(블록힘)

ABSTRACT

Terfenol-D is one of magnetostrictive materials which have the property of converting the energy in magnetic fields into mechanical movement and vice versa. We designed and fabricated a linear magnetostrictive actuator using Terfenol-D. It has 25 mm diameter and 100 mm long. To grasp the characteristics of it, a series of tests were performed in the range of 50 Hz below. Induced-strain actuation displacements of the actuator measured by test and predicted by magnetic analysis agreed well. And blocked forces according to the input currents were estimated from the testing results. Modelling method representing the exerting force of a linear magnetostrictive actuator was confirmed through some testing results.

1. 서 론

최근 지능 재료를 이용한 구조물의 진동 제어에 대한 관심과 응용에 관한 연구가 진척되고 있다. 그 중 Terfenol-D 재료는 자기장의 변화에 따라 생기는 재료의 변형률을 이용하여 힘을 내는 자기변형 지능 재료이다. 이 재료의 물리적인 특성과 이를 이용한 자기변형 구동기의 설계 및 제작에 관한 연구는 지난 20년 동안 미국 및 유럽 등에서 연구가 되었다.^(1,2) 그리고 Terfenol-D 재료의 특성을 이용한 자기변형 구동기를 구조물의 진동 제어에 적용한 연구는 1980년 말에 처음으로 연구되었으며,⁽³⁾ 그 후 약 10년 동안 유럽, 미국 등에서 연구가 진행되고 있다.⁽⁴⁾ 국내

에서는 Terfenol-D를 이용한 연구로 자벌레모터 (inchworm motor)⁽⁵⁾와 센서로의 응용사례⁽⁶⁾가 있지만, Terfenol-D를 이용한 구조물의 진동 제어에 대한 연구가 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다.

Terfenol-D를 이용한 선형 자기변형 구동기를 설계 및 제작하여 구조물의 진동 제어에 적용하기 위해서는 구동기의 기본적인 특성인 유도 자유 변위 (induced-strain actuation displacement) 및 블록힘 (blocked force)의 예측이 매우 중요하다. 본 논문에서는 지름 25 mm, 길이 100 mm인 Terfenol-D 막대를 이용하여 선형 자기변형 구동기를 설계 및 제작하였고, 이의 기본적인 특성을 파악하기 위해서 50 Hz 이하의 주파수 영역에서 일련의 동특성 실험을 수행하였다. 실험에 의해서 측정된 구동기의 유도 자유 변위는 자기장 해석에 의해 예측된 값과 거의 일치하였다. 제작된 구동기의 블록힘을 실험결과를 통해 추정하여, 이 구동기에서 발휘되는 힘을 나타내기 위한 모델 방법의 타당성을 실험적으로 확인하였다.

[†] 책임저자, 정희원, 한국기계연구원 구조연구부
E-mail : lchw@kimm.re.kr

Tel : (042) 868-7489, Fax : (042) 868-7418

* 정희원, 한국기계연구원 구조연구부

2. Terfenol-D의 물리적 특성 및 장점

Terfenol-D는 3개의 금속(terbium, iron, dysprosium-D)으로 구성된 금속합금으로 성분비는 $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.92}$ 로, 일반적인 기계, 전기 및 자기적 특성은 Table 1과 같다. Terfenol-D는 최대 1000~2000 ppm의 큰 변형률을 가지며, 응답 속도가 수 μsec 로 매우 빠르고, 동작 주파수의 범위가 DC~수십 kHz로 매우 넓은 것으로 알려져 있다. 또한 장기적인 사용에 의한 기계적 및 자기적 특성의 저하가 발생하지 않으며 생명 주기가 무한하여 높은 신뢰성을 가지며, 사용 온도 범위가 약 $-20^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ 로 매우 넓고, 압축 강도가 높고, 낮은 공급 전압으로 작동되는 장점들을 가지고 있다.^(8, 9)

3. Terfenol-D를 이용한 선형 자기변형 구동기의 설계 및 제작

지름 25 mm, 길이 100 mm인 Terfenol-D 막대를 이용하여 선형 자기변형 구동기를 설계 및 제작하였다. 제작을 위해 Terfenol-D 막대에 가해주는 프리스트레스(prestress), 자기 바이어스(magnetic bias), 영구자석, 코일, 하우징 등을 설계해야 한다.

Terfenol-D 막대의 변형률은 자계 강도(magnetic field intensity)뿐만 아니라 막대에 걸어주는 프리스트레스에 따라 그 특성이 매우 달라지므로, 최대의 변형률을 얻기 위한 프리스트레스를 결정해야 한다.

Table 1 Physical properties of Terfenol-D⁽⁷⁾

Mechanical properties	- Young's modulus 25~35 GPa - Compressive strength 700 Mpa - Tensile strength 28 Mpa - Sound speed 1640~1940 m/s
Electrical properties	- Resistivity : 58 $\mu\Omega\text{cm}$ - Curie temperature 380 $^{\circ}\text{C}$
Magnetostrictive properties	- Maximum strain : 1000~2000 ppm - Strain estimated linear : 800~1200ppm - Energy density 14-25 kJ/m^2
Magneto mechanical properties	- Relative permeability : 3~10 - Coupling factor : 0.75

Fig. 1에서는 프리스트레스에 따른 Terfenol-D 막대의 변형률을 보여주고 있다. 프리스트레스가 1 ksi(7 MPa)에서 가장 큰 변형률이 생기며, 자계 강도에 따른 변형률의 선형구간이 가장 큼을 확인할 수 있다. 제작 시에는 내경 25 mm, 외경 50 mm, 높이 50 mm, 강성 324 N/mm인 금형 스프링을 약 12 mm 압축하여 1 ksi의 프리스트레스를 구현하였다.

Terfenol-D 막대의 변형률은 전 구간에서 자계 강도에 비선형적이고, 극성이 없으므로(자계 강도의 방향에 상관없이 항상 늘어남), Fig. 2에서 보여주는 것처럼 입의의 선형구간에 대하여 영구 자석을 이용하여 자기 바이어스(H_b)를 걸어주어 극성을 가지게 해야 한다. 프리스트레스가 1ksi에서 자기 바이어스는 약 20 kA/m정도가 적당함을 Fig. 1에서 알 수 있다.

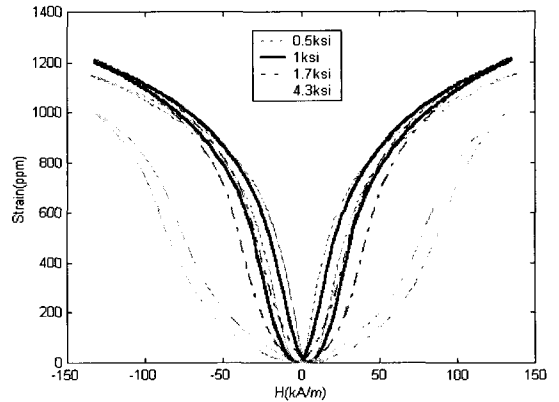


Fig. 1 S-H Curves according to the prestress

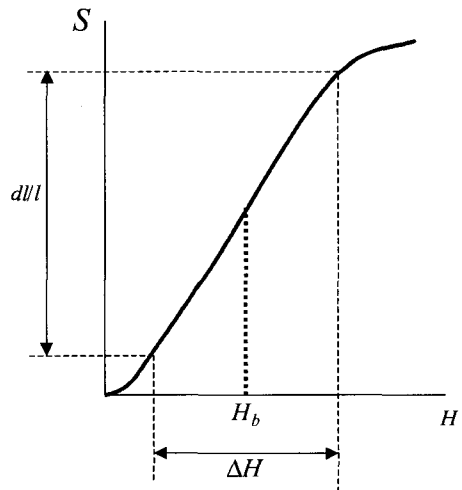


Fig. 2 Magnetic bias

Terfenol-D 막대를 이용한 선형 자기변형 구동기의 형태는 Terfenol-D 막대 주위에 원하는 자기장을 형성하기 위한 코일과 요크, 그 주위에 자기 바이어스를 걸어주기 위한 영구 자석으로 구성된다. 자로를 형성하기 위하여 강자성체인 철을 Terfenol-D 막대 양 끝단에 두었고, 자기장 해석을 통해 코일의 턴수와 코일이 차지하는 두께, 영구자석의 두께, 철의 두께를 결정하였다. FEM으로 비선형 자기장 해석을 수행한 결과 영구자석은 페라이트계에 대하여 폭이 11 mm로, 코일은 지름 1.0 mm, 구동 전류 5.0 A에 대하

여 턴수는 700번으로(이는 점적률 0.65에 대하여 코일 전체가 차지하는 부분의 폭은 12 mm임), 양 끝단의 철의 두께는 8 mm로 선정되었다.

Fig. 3은 폭이 11 mm인 페라이트계 영구자석에 의한 Terfenol-D 막대에 생기는 자계 강도를 보여 주고 있고, Fig. 4는 구동 전류 5.0 A에서 코일에 의해 Terfenol-D 막대에 생기는 자계 강도의 자기장 해석 결과를 보여준다. Fig. 5는 설계된 구동기를, Fig. 6은 제작된 구동기를 보여준다. 실제 제작 시에 코일의 턴수는 781번이었다.

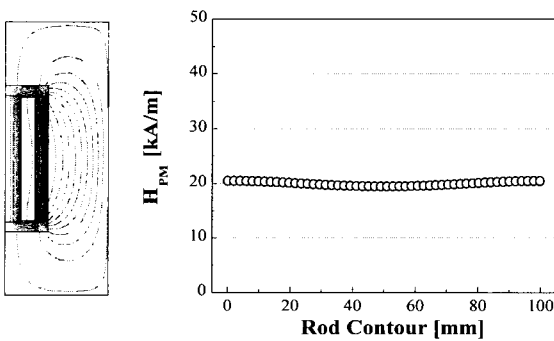


Fig. 3 Magnetic field intensity in Terfenol-D induced by ferrite permanent magnet

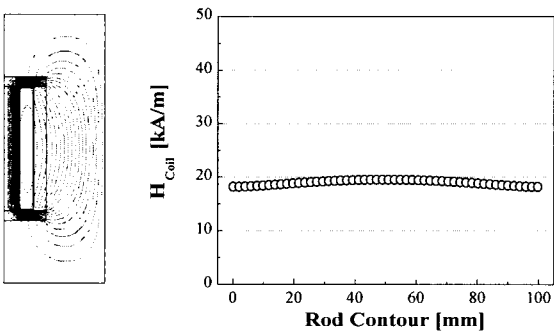


Fig. 4 Magnetic field intensity in Terfenol-D induced by coils

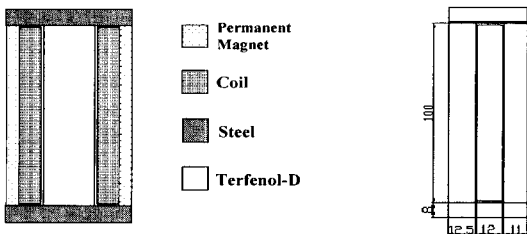


Fig. 5 Designed actuator

4. 자기 변형 구동기의 변위 특성

먼저 제작된 구동기의 변위 특성을 파악하기 위해 50 Hz이하의 주파수 영역에 대하여 일련의 동특성 실험을 수행하였고, 이를 이론적인 해석 결과와 비교하였다.

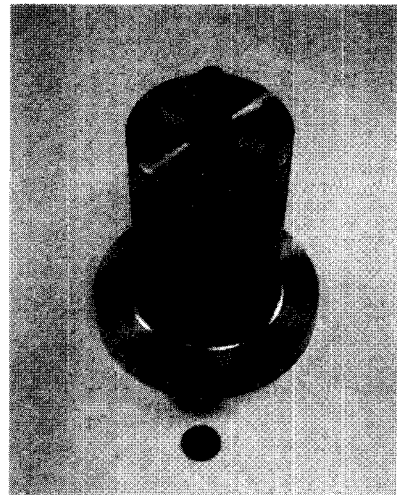


Fig. 6 Fabricated actuator

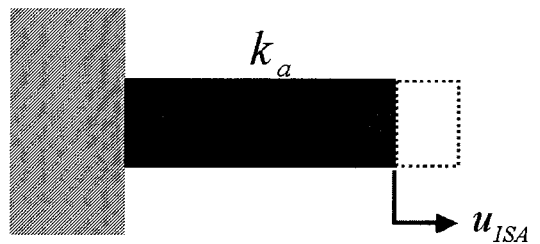


Fig. 7 Schematic representation of the induced-strain actuation displacement of the actuator at free end

4.1 실험구동기의 변위 특성 실험

구동기의 외부에 아무런 힘이 가해지지 않은 상태에서 구동기에 전류를 인가시킬 때 Terfenol-D 막대에 생기는 자기장에 의해서 생기는 변위를 유도 자유 변위(u_{ISA} , induced-strain actuation displacement)라고 한다. Fig. 7은 이를 도식화하여 보여 주고 있다. 여기서 k_a 는 구동기의 강성을 말한다. Fig. 8은 유도 자유 변위를 측정하기 위한 실험 모습을 보여주고 있는데, 갭센서(gap sensor)를 이용하여 변위를 측정하였다. Fig. 9는 DC에서의 인가 전류에 따른 구동기의 유도 자유 변위를 보여 주고 있는데, 3A까지는 거의 선형적인 관계가 있음을 확인할 수 있고, 이 때의 인가전류에 따른 유도 자유 변위는 $9.17 \mu\text{m}/\text{A}$ 였다.

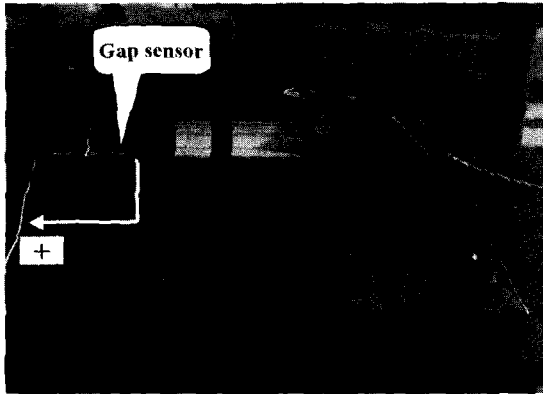


Fig. 8 Measuring induced-strain actuation displacement of the actuator

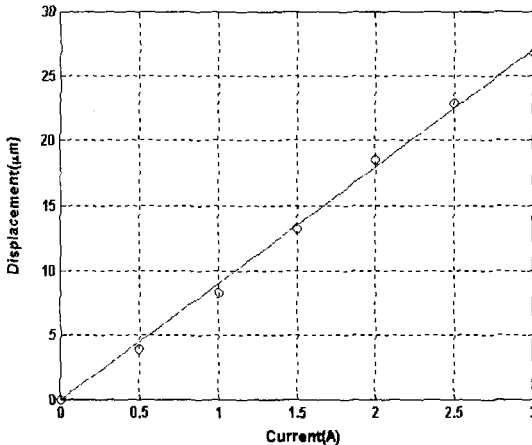


Fig. 9 Induced-strain actuation displacement of the actuator according to the current at DC

Fig. 10은 주파수 및 인가 전류에 따른 구동기의 인가 자유 변위를 보여 주고 있는데, 주파수에 상관없이 일정한 변위를 가짐을 확인할 수 있다.

4.2 구동기의 변위 특성의 이론적인 고찰

제작된 구동기의 유도 자유 변위 특성을 선형 자기장 해석을 통하여 이론적으로 고찰해 보았다. 선형 자기장 해석에 사용된 자기 경로는 Fig. 11과 같은데, 페라이트계의 영구자석의 상대투자율이 매우 작으므로 코일에 인가되는 전류에 의해서 형성되는 자기장의 경로는 Terfenol-D 막대와 하우징을 지난 후에 영구자석과 외부의 공기로 갈라지는 것으로 생각하여 2개의 경로로 나누었다. 여기서 하우징의 두께 $w_h=8$

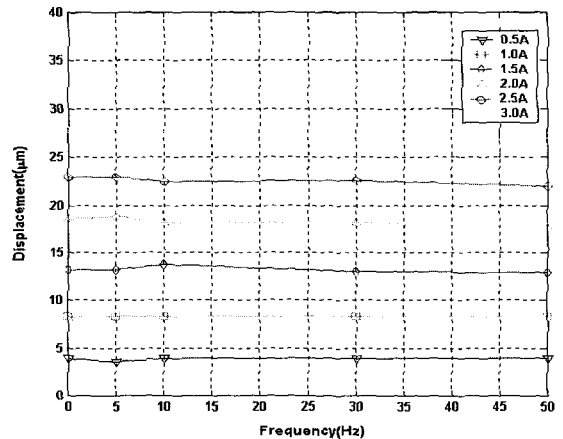


Fig. 10 Induced-strain actuation displacement of the actuator according to the frequency

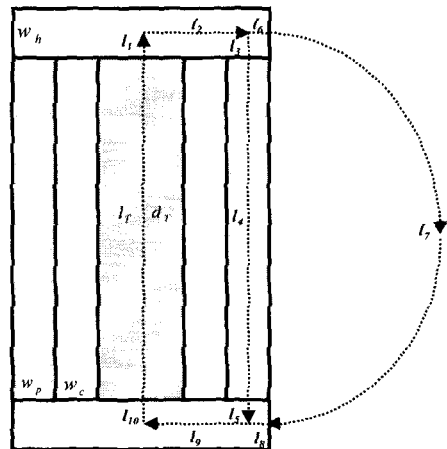


Fig. 11 Magnetic path

mm, 영구자석의 두께 $w_p=11$ mm, 코일의 두께 $w_c=12$ mm, Terfenol-D 막대의 지름 $d_T=25$ mm, 길이 $l_T=100$ mm이다. 등가 자기회로는 Fig. 12와 같다. 여기서 N 은 코일의 턴수, I 는 인가 전류, 자기 저항 $R_i = \frac{l_i}{\mu_i A_i}$ 이다. μ_i 는 투자율이고, 등가 길이는 식 (1)과 같고, 등가 단면적은 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned}
 l_T &= l_4 \\
 l_1 &= l_3 = l_5 = l_{10} = w_p / 2 \\
 l_2 &= l_9 = d_T / 2 + w_c + w_p / 2 \\
 l_6 &= l_8 = w_p / 2 \\
 l_7 &= \pi(l_3 + l_4 + l_5) / 2 \\
 A_1 &= A_1 = A_{10} = \pi d_T^2 / 4 \\
 A_2 &= A_9 = \pi w_h l_2 \\
 A_3 &= A_4 = A_5 = 4\pi l_2 l_6 \\
 A_6 &= A_8 = \pi w_h l_6 (l_2 + 2l_6) \\
 A_7 &= \pi(l_2 + l_6)(r_b - r_a) + 2(r_b^2 - r_a^2) \\
 r_a &= \frac{l_4}{2} - w_p, \quad r_b = \frac{l_4}{2} + w_h + w_p
 \end{aligned} \tag{1}$$

자기 손실이 없다고 가정하면, 식 (3)의 Maxwell 방정식은 식 (4)와 같이 된다.

$$NI = \oint \vec{H} d\vec{x} \tag{3}$$

$$NI = H_T l_T + R_y A_T \mu_T H_T \tag{4}$$

여기서 H_T 는 Terfenol-D에 형성되는 자계 강도, A_T 는 Terfenol-D의 단면적, μ_T 는 Terfenol-D의 투자율, R_y 는 R_1 에서 R_{10} 에 대한 등가 자기저항이다. Fig. 1의 S-H곡선에서 자기 바이어스(H_b)에서 기울기 c_b 를 이용하여 H_T 를 표현하면 식 (5)와 같다.

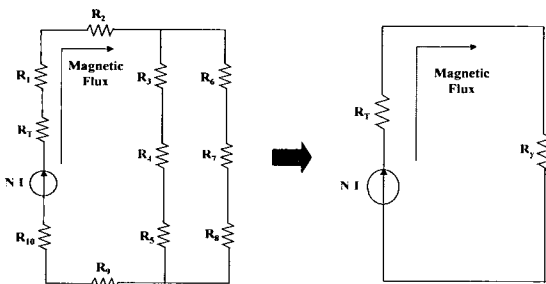


Fig. 12 Equivalent magnetic circuit

$$H_T = \frac{u_{ISA}}{c_b l_T} \tag{5}$$

식 (5)를 식 (4)에 대입하여 정리하면 인가전류에 대한 유도 자유 변위는 식 (6)과 같은데, 실험 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있다.

$$\frac{u_{ISA}}{I} = \frac{c_b N l_T}{l_T + R_y A_T \mu_T} = 9.35 \mu\text{m/A} \tag{6}$$

5. 선형 자기 변형 구동기의 힘 특성

다음으로 제작된 구동기의 힘 특성을 파악하기 위해 50 Hz 이하의 주파수 영역에 대하여 일련의 동특성 실험을 수행하였다. 제작된 구동기의 힘은 블록힘(blocked force)으로 대표될 수 있다. 그러나 이 힘을 직접 측정하기 위해서는 구동기의 거동을 구속하는 외부의 강성이 무한해야하므로, 이를 직접적으로 측정하는 것은 매우 어렵다. 본 연구에서는 동특성 실험 결과로부터 이 힘을 간접적으로 추정하였다.

5.1 구동기의 힘 특성 실험

실험 모습은 Fig. 13과 같은데, 구동기의 양단을 구속하여 Piezoelectric형의 Force-transducer를 이용하여 구동기의 힘(F_a)을 측정하였고, 동시에 이 때의 구동기의 변위(u)를 Gap 센서를 이용하여 측정하였다. 지그의 강성을 k_e 라고 하면 이는 Fig. 14와 같이 도식화된다. 구동기의 양단을 구속하는 지그의 강성은 무한하지 않으므로 구동기는 변위($0 < u < u_{ISA}$)를 가지게 된다. Fig. 15와 Fig. 16은 DC인 경우에 대하여

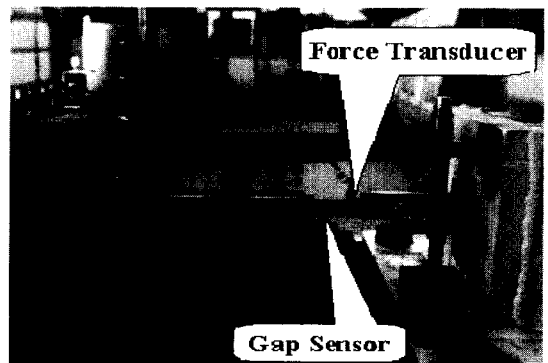


Fig. 13 Measuring force of the actuator with flexible support

인가 전류에 따라 구동기에서 발휘되는 힘과 변위를 보여 주고 있는데, 선형적인 특성을 가짐을 알 수 있다. Fig. 17과 Fig. 18은 주파수 및 인가 전류에 따른 구동기의 힘과 변위를 보여 주고 있는데, 주파수에 상관없이 일정한 힘과 변위를 가짐을 확인할 수 있다. Fig. 19는 그 중 인가전류가 1.5 A, 10 Hz인 경우에 대한 구동기의 힘과 변위의 시간이력을 보여주고 있다.

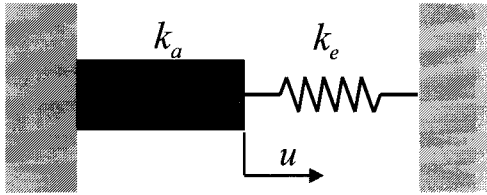


Fig. 14 Schematic representation of the actuator with flexible structure

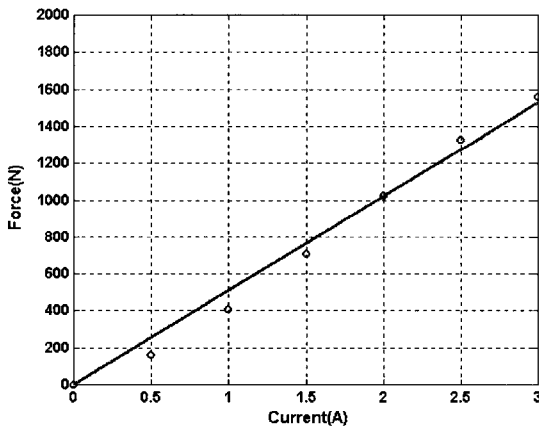


Fig. 15 Force of the actuator according to the current at 5 Hz

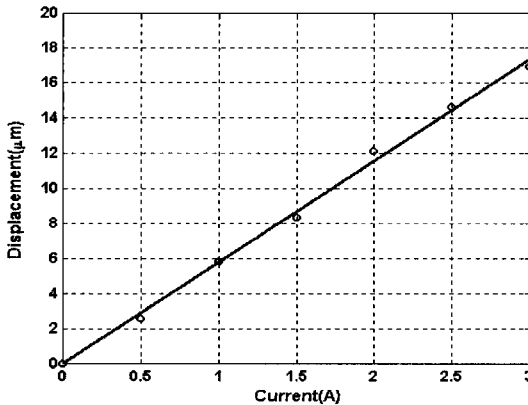


Fig. 16 Displacement of the actuator according to the current at 5 Hz

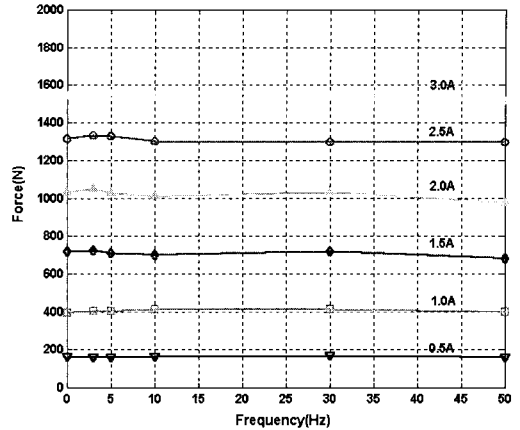


Fig. 17 Force of the actuator according to the frequency

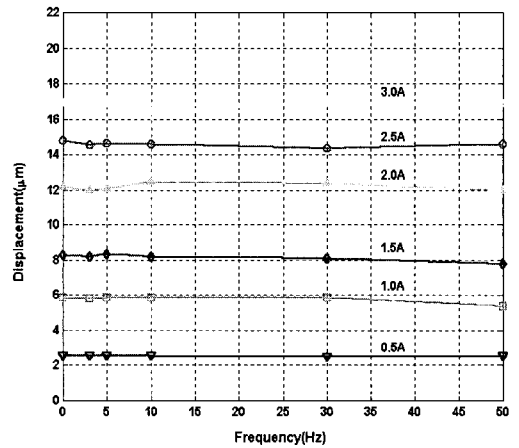


Fig. 18 Displacement of the actuator according to the frequency

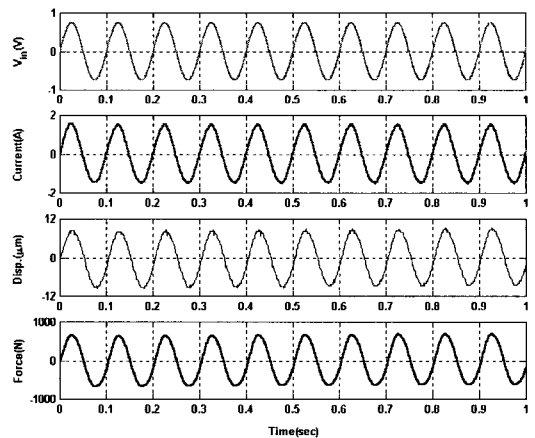


Fig. 19 Time history of the input voltage, current, displacement and force of the actuator(10 Hz, 1.5 A)

5.2 구동기의 힘 특성의 고찰

제작된 구동기의 힘은 블록힘(F_b)으로 대표될 수 있는데, 이 힘을 직접 측정하는 것은 매우 어려우므로 앞의 동특성 실험 결과로부터 이 힘을 간접적으로 추정하였다.

일반적으로 구동기의 블록힘은 식 (7)과 같이 구동기의 강성(k_a)과 유도 자유 변위(u_{ISA})의 곱으로 정의한다.

$$F_b = k_a u_{ISA} \quad (7)$$

구동기의 강성 $k_a = A_T E_T / l_T = 149.21 \text{ MN/m}$ 이다.

위의 구동기의 블록힘은 앞의 실험에서와 같이 구동기의 힘과 변위를 동시에 측정함으로써 식 (8)과 같이 간접적으로 추정이 가능하다.

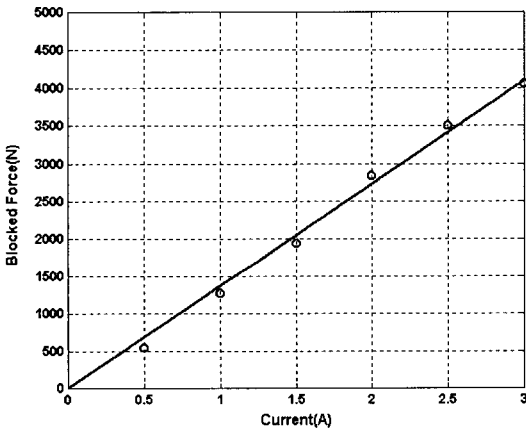


Fig. 20 Blocked force of the actuator according to the current at DC

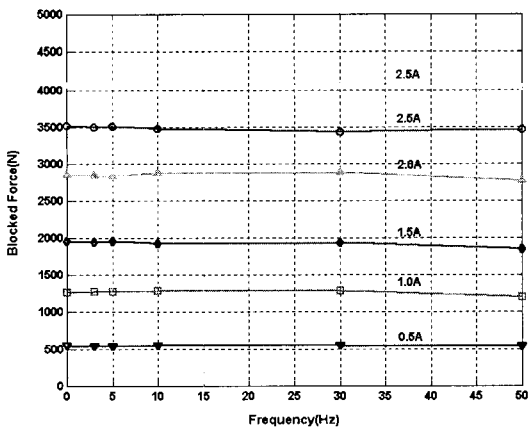


Fig. 21 Blocked force of the actuator according to the frequency

$$F_b = F_a + k_a u \quad (8)$$

실험을 통해 추정된 F_b 를 Fig. 20은 DC인 경우에 대해, Fig. 21은 주파수에 대하여 식 (8)을 이용하여 보여주고 있는데 주파수에 상관없이 일정함을 확인할 수 있다($F_b/I = 1.36 \text{ kN/A}$). Fig. 22는 식 (7)과 식 (8)에 의한 F_b 를 DC인 경우에 대하여 비교하여 보여주고 있는데, 거의 일치함을 확인할 수 있다. 이는 구동기의 블록힘은 직접적인 힘을 측정할 필요 없이 유도 자유 변위만을 측정함을 통해 알 수 있음을 보여주는 것이다.

Fig. 14처럼 구동기에 외부 구조물이 연결된 경우에, 구동기의 변위(u) 및 구동기에서 발휘되는 힘(F_a)은 외부 구조물의 강성(k_e)과 유도 자유 변위(u_{ISA})를 알면 가능하다. Fig. 23은 실험 시의 외부 지그 구조물의 강성을 보여주고 있다. 구동기의 변위

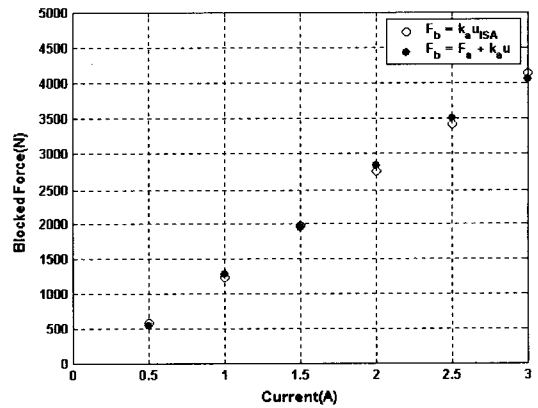


Fig. 22 Comparison of blocked forces of the actuator according to the current

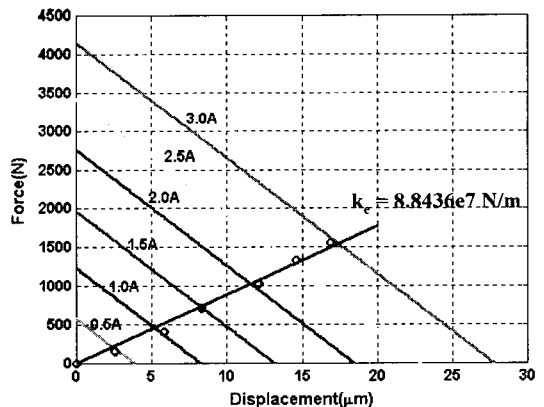


Fig. 23 Stiffness of the flexible support

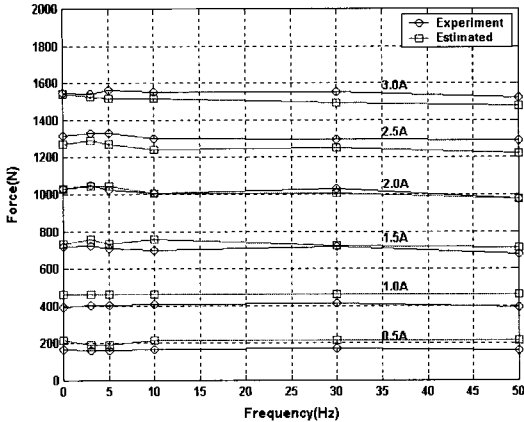


Fig. 24 Comparison of forces of the actuator with flexible support

와 힘의 관계는 식 (8)을 이용하여 인가 전류에 따라 나타내었는데, 실험을 통해 측정된 점들은 식 (8)에 의해 계산된 값과 대체로 일치함을 알 수 있다. 외부 구조물의 강성이 클수록 구동기의 변위는 작아지지만 구동기의 힘은 커짐을 확인할 수 있다. 따라서 구동기에서 발휘되는 힘(F_a)은 식 (9)로 표현된다.

$$F_a = k_e \cdot u \tag{9}$$

식 (7)과 식 (9)를 식 (8)에 대입하면 구동기의 변위는 식 (10)과 같고, 이를 식 (9)에 대입하면 구동기의 힘은 식 (11)과 같다.

$$u = \frac{u_{ISA}}{1 + \frac{k_e}{k_a}} \tag{10}$$

$$F_a = k_e \cdot \frac{u_{ISA}}{1 + \frac{k_e}{k_a}} \tag{11}$$

Fig. 24는 외부 구조물의 강성과 유도 자유 변위를 이용하여 계산된 구동기에서 발휘되는 힘을 실험결과와 비교하여 보여주고 있는데, 큰 오차가 없음을 확인할 수 있다. 이는 구동기의 변위와 구동기에서 발휘되는 힘은 식 (10)과 식 (11)을 통해 추정 가능함을 보여 준다.

6. 결 론

본 연구에서는 지름 25 mm, 길이 100 mm인

Terfenol-D 막대를 이용하여 선형 자기변형 구동기를 설계 및 제작하였고, 이의 기본적인 특성을 파악하기 위해서 50 Hz 이하의 주파수 영역에서 일련의 동특성 실험을 수행하였다. 제작된 구동기는 3 A 이하의 인가 전류에 대하여 선형적인 특성을 가짐을 확인할 수 있었다. 자기장 해석에 의해 예측된 구동기의 유도 자유 변위(induced-strain actuation displacement)는 실험에 의해서 측정된 값과 거의 일치하였다. 제작된 구동기의 블록힘(blocked force)은 구동기의 외부에 구조물을 연결한 상태에서 힘과 변위를 동시에 측정함으로써 간접적으로 추정하였다. 이를 바탕으로 구동기의 블록힘은 구동기의 강성과 구동기의 유도 자유 변위의 곱으로 나타낼 수 있음을 확인하였다. 그리고 구동기가 외부 구조물과 연결된 경우에, 구동기의 변위와 발휘되는 힘은 외부 구조물의 강성과 유도 자유 변위를 알면 가능함을 확인하였고, 구동기의 변위와 힘을 나타내기 위한 모델 방법의 타당성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업 중 “제진장치를 활용한 체진설계 기술개발” 사업의 일환으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사를 드립니다. 자기장 해석 및 제작에 협력해 주신 충남대학교 전자기파기술연구소 장석명 교수님팀 및 한국기계연구원 첨단산업 기술 연구부 기전응용그룹팀에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Monaco, E., Franco, F. and Lecce, L., 2000, “Designing a Magnetostrictive Actuator by Using Simple Predictive Tools and Experimental Data,” Actuator 2000, B.5.1.
- (2) Stillesj, F., Engdahl, G., May, C. and Janocha, H., 2000, “Design, Manufacturing and Experimental Evaluation of a Magnetostrictive Actuator for Active Vibration Control and Damage Analysis,” Actuator 2000, B.5.2.
- (3) Hiller, M. W., Bryant, M. D. and Umegaki, J., 1989, “Attenuation and Transformation of Vibration Through Active Control of Magnetostrictive Terfenol,” Journal of Sound and Vibration, Vol. 34.

No. 3, pp. 507~519.

(4) Giurgiutiu, V., Rogers, C. A. and Rusovici R., 1996, "Solid-state Actuation of Rotor Blade Servo-flap for Active Vibration Control," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 7, pp. 192~202.

(5) Kim, J. H., Kim, J. D. and Choi, S. B., 2002, "A Hybrid Inchworm Linear Motor," *Mechatronics*, Vol. 12, pp. 525~542.

(6) 조승현, 김영규, 김윤영, 2002, "마그네토스트

릭션 센서 성능 향상을 위한 바이어스 자기장의 위상 최적설계," *한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집*, pp. 554~558.

(7) <http://www.etrema-usa.com>, 2002.

(8) Engdahl, G., 2000, "Handbook of Giant Magnetostrictive Materials." Academic Press.

(9) Jenner, A. G., Smith, R. J. E., Wilkinson, A. J. and Greenough, R. D., 2000, "Actuation and Transduction by Giant Magnetostrictive Alloys," *Mechatronics*, Vol. 10, pp. 457~466.